

插层熔喷非织造材料的性能控制研究

项 辉¹, 梁云舒², 刘永清³

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

³上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2022年10月20日; 录用日期: 2022年11月17日; 发布日期: 2022年11月24日

摘 要

本文在插层率固定的情况下, 研究不同工艺参数组合的插层熔喷非织造材料的结构变量和产品性能。通过变量的调式建立最优化的多项式拟合模型, 代入预处理后的数据, 得到工艺参数与结构变量之间的关系, 并通过数据可视化和三维拟合图使结果更直观。对经过雅克 - 贝拉检验后的数据使用样本皮尔逊相关系数法, 再辅以蒙特卡罗法和非线性规划模型求解出何时过滤效率的最优解。在满足实际生产条件的基础上, 通过使用消除量纲且被转化为最大化变量后的数据, 将其代入加权组合降维后的单目标规划模型, 得到结构参数的组合使得过滤效率尽可能大的同时过滤阻力尽可能的小。

关键词

插层熔喷非织造材料, 多项式拟合, 皮尔逊相关系数, 蒙特卡罗法, 非线性规划模型

Study on Property Control of Intercalated Melt-Blown Nonwovens

Hui Xiang¹, Yunshu Liang², Yongqing Liu³

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

³College of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 20th, 2022; accepted: Nov. 17th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

Abstract

In this paper, the structural variables and product properties of intercalated melt-blown nonwovens with different combination of process parameters are studied under the condition of fixed intercalation rate. The optimized polynomial fitting model was established through the variable

mode, and the relationship between process parameters and structural variables was obtained by substituting the preprocessed data. The results were made more intuitive by data visualization and 3D fitting diagram. The sample Pearson correlation coefficient method, Monte Carlo method and nonlinear programming model are used to obtain the optimal solution of when filtering efficiency. On the basis of meeting the actual production conditions, by using the data after dimensionality elimination and transformed into maximized variables, and substituting them into the single objective programming model after dimensionality reduction by weighted combination, the combination of structural parameters can make the filtering efficiency as large as possible and the filtering resistance as small as possible.

Keywords

Intercalated Melt-Blown Nonwoven Materials, Polynomial Fitting, Pearson Correlation Coefficient, Monte Carlo Method, Nonlinear Programming Model

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20年新冠肺炎疫情的爆发以来,医用口罩的需求量急剧增加。呼吸道飞沫传播是新冠肺炎疫情传播的主要途径之一,随着人们安全意识的提高,口罩的需求量与日俱增,因此人们对口罩的防护作用和舒适度都有了更高的要求[1]。传统口罩采用熔喷非织造材料,熔喷非织造技术是高效生产和加工产业用纺织品的重要手段,具有产品工艺流程短、生产效率高、纤维超细等独特优势[2]。随着社会的发展和人们环保意识的加强,以及在SARS、禽流感等全球安全突发事件的影响下,世界范围内的熔喷非织造技术得到飞速发展,我国在熔喷非织造技术和应用方面也有了巨大进步。

但是由于熔喷非织造技术性能无法得到保障,通过不断改进又创造出插层熔喷法,即通过在聚丙烯熔喷制备过程中将涤纶短纤等纤维插入熔喷纤维流,制备出了“Z型”结构的插层熔喷非织造材料。传统熔喷非织造法利用高温高速热空气对熔体进行喷吹,将高分子原材料转化为纤网,与其相比插层熔喷非织造利用高卷曲短纤维的刚性大,弹性好的特点以及粗细纤维互相补偿的方法有效解决压缩弹性差的问题[3]。

插层熔喷非织造材料制备工艺参数较多,参数之间还存在交互影响,加上插层气流之后更为复杂,所以通过工艺参数(接收距离和热空气速度)决定结构变量(厚度、孔隙率、压缩回弹性),而由结构变量决定最终产品性能(过滤阻力、过滤效率、透气性)的研究也变得较为复杂。因此,为产品性能调控机制的建立提供一定的理论基础,本文分别建立工艺参数与结构变量、结构变量和产品性能之间的关系模型探究其内部的联系,为更进一步提高产品的性能,提供理论支持。

2. 基于多项式拟合模型的参数间关系求解

2.1. 多项式拟合模型的建立

多项式拟合是一种线性模型,构造多项式函数,使用足够多的阶数近似的表示输入输出的关系。一般线性回归模型为 x 的线性函数,其数学表达式为:

$$y(x) = ax + b$$

拟合抛物面需要考虑输入变量 x 的二次项的线性组合,数学表达式为:

$$y(x) = \omega_0 + \omega_1 x + \omega_3 x^2$$

输入变量为 x 和 y , 获得因变量 z 与 x 和 y 的关系的多项式关系(以二次项为例)为:

$$z(x, y) = \omega_0 + \omega_1 x + \omega_2 y + \omega_3 x^2 + \omega_4 y^2 + \omega_5 xy$$

多项式拟合也是一个线性模型, 其数学表达式为:

$$y(x, \omega) = \sum_{j=0}^M \omega_j x^j$$

其中 M 是多项式的最高次数, x^j 代表的是 x 的 j 次幂, ω_j 是 x^j 的系数。样本的数目为 N , 对于每一个样本 x_n , 其对应的输出为 t_n , 用平方误差和作为损失函数, 得到的表达式如下:

$$E(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \{y(x_n, \omega) - t_n\}^2 \quad [4]$$

2.2. 数据异常值处理

数据异常值指样本中的一些数值明显偏离其余数值的样本点, 所以也称为离群点。忽视异常值的存在会产生不良影响, 导致后续的数据分析和建模出现偏差。本文采用的是一维或低维特征空间的参数异常值检测方法 Z-score 方法, 其服从于高斯分布, 异常值远离于数据的平均值。距离远近采用归一化数据点 Z_i 的设定阈值 Z_{thr} 进行判断:

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

x_i 是组合中的其中一个数据点, μ 为所在组合的三个数据的平均值, σ 为组合所有点的标准偏差。经过标准化处理后, 异常值也进行标准化处理绝对值大于 Z_{thr} , 一般设为 2.5, 3.0, 3.5, 经过该步处理后的数据如附件 1 所示。

在完成模型的建立与数据预处理后, 通过将附件 1 中的数据分别带入得到的多项式中, 研究各工艺参数与各结构变量之间的关系。

2.3. 厚度与工艺参数的关系

接受距离 x 、热风速度 y 与厚度 z 的线性公式如下:

$$z = -2.965 - 0.01934x + 0.008278y + 0.001119x^2 + 6.383 \times 10^{-6}xy - 3.314 \times 10^{-6}y^2$$

得到厚度分别与热风速度、接受距离的关系曲线如图 1 和图 2 所示:

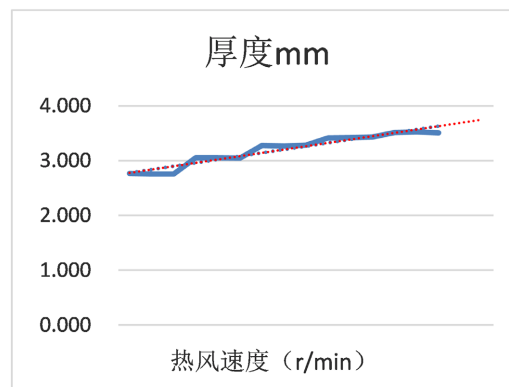


Figure 1. Relation curve between thickness and hot air velocity

图 1. 厚度与热风速度的关系

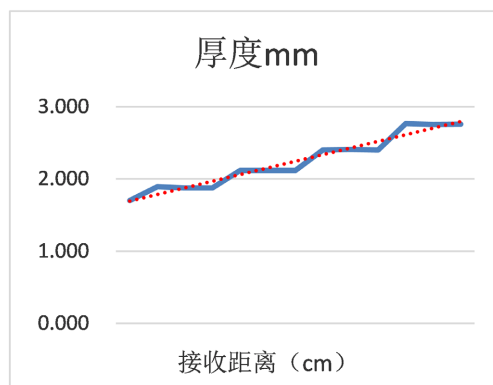


Figure 2. Relation curve between thickness and receiving distance
图 2. 厚度与接收距离的关系

由此可知当热风速度保持不变时，接收距离越大，其厚度越大，当接收距离保持不变时，热风速度越大，其厚度越大。利用 matlab 的 cftool 工具箱绘制出的三维拟合图，如图 3 所示：

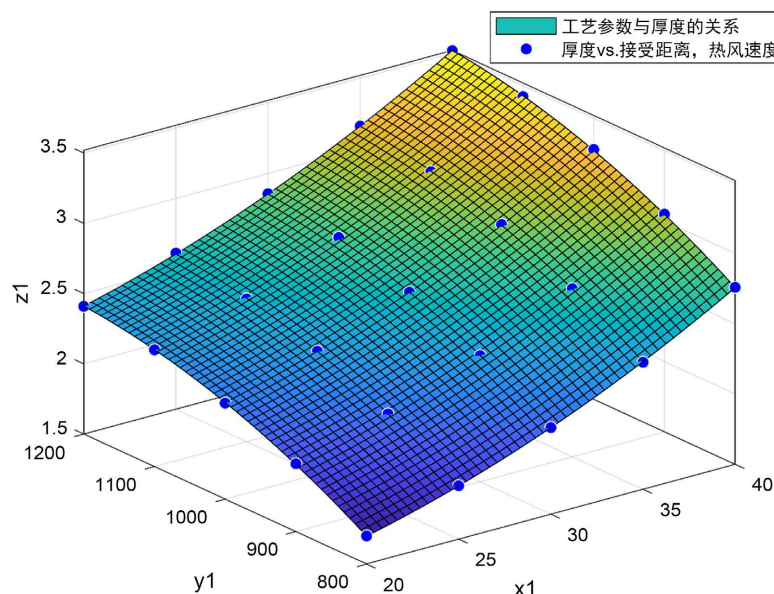


Figure 3. Relationship between process parameters and thickness
图 3. 工艺参数与厚度的关系

拟合优度 $R^2 = 0.9999$ ，误差平方和 $SSE = 0.000369$ ，均方根误差 $RMSE = 0.004409$ 。 R^2 接近 1，即误差平方和接近 0，说明拟合效果好。

2.4. 孔隙率与工艺参数的关系

孔隙率 z 与接受距离 x 、热风速度 y 之间的线性公式为：

$$z = 96.29 + 0.4548x + 0.3239y - 0.01331x^2 - 0.71938xy - 0.4581y^2 \\ + 0.02673x^3 + 0.009853x^2y + 0.03002xy^2 + 0.0424y^3 + 0.2458x^3y \\ + 0.04177x^2y^2 + 0.05226xy^3 + 0.03561y^4$$

利用 matlab 的 cftool 工具箱绘制出的三维拟合图，如图 4 所示：

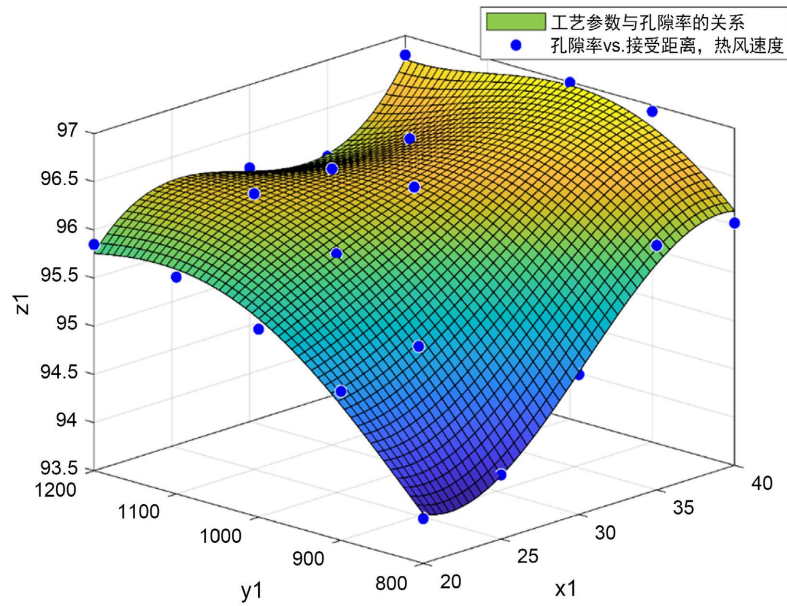


Figure 4. Relationship between process parameters and porosity
图 4. 工艺参数与孔隙率的关系

将输入变量 x 和 y 进行标准化处理:

$$x_1 = \frac{x-30}{7.217}, y_1 = \frac{y-1000}{144.3}$$

拟合优度 $R^2 = 0.9814$ ，误差平方和 $SSE = 0.2702$ ，均方根误差 $RMSE = 0.1567$ 。多项式次数过高会造成龙格现象，龙格现象指对于某些函数，使用均匀节点构造高次多项式差值时，可能会出现现在插值区间的边缘误差很大的现象。由此可知，并不是插值多项式的阶数越高，效果就越好[5]。改进后孔隙率 z 与接收距离 x 、热风速度 y 的线性关系为:

$$z = 68.58 + 0.2657x + 0.04236y + 0.0005143x^2 - 0.0002235xy - 1.643 \times 10^{-5}y^2$$

当接收距离不变时，热风速度越大，孔隙率越大，当热风速度不变时，接收距离越大，孔隙率越大，所得到的折线图如图 5 和图 6 所示:

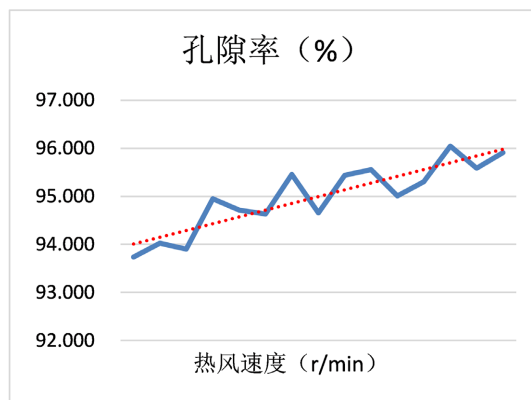


Figure 5. Relationship between porosity and hot air velocity
图 5. 孔隙率与热风速度的关系

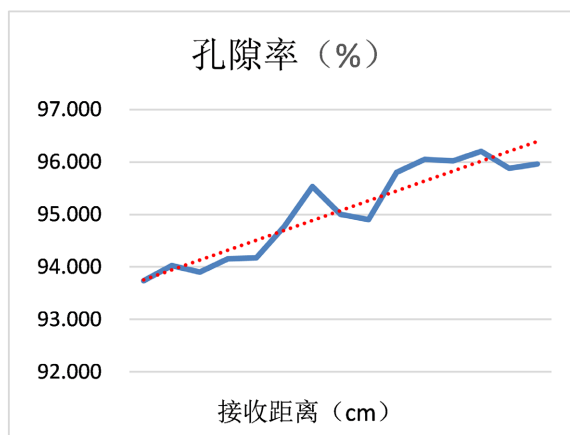


Figure 6. Relationship between porosity and receiving distance
图 6. 孔隙率与接收距离的关系

利用 matlab 的 cftool 工具箱绘制出三维拟合图，如图 7 所示：

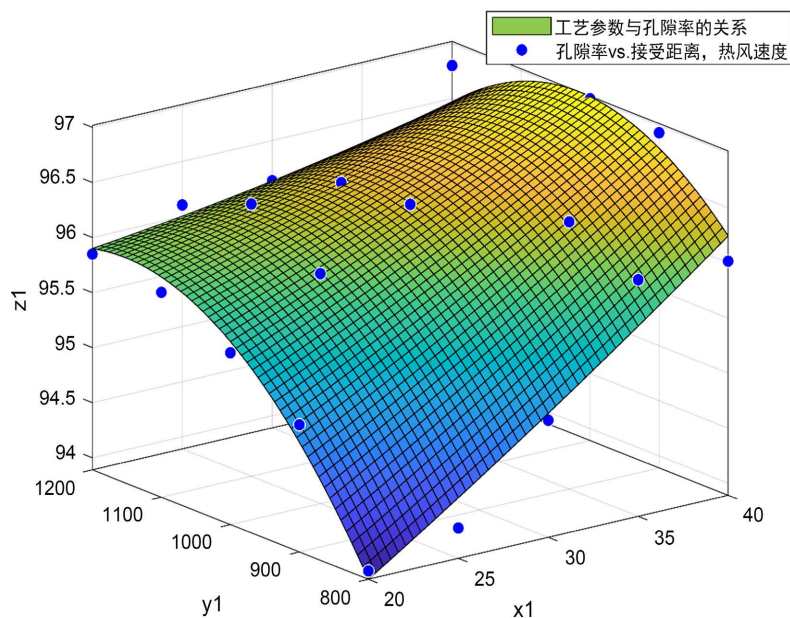


Figure 7. Relationship between improved process parameters and porosity
图 7. 改进后工艺参数与孔隙率的关系

拟合优度 $R^2 = 0.9443$ ，误差平方和 $SSE = 0.8094$ ，均方根误差 $RMSE = 0.2064$ 。

2.5. 压缩回弹性率与工艺参数的关系

压缩回弹性率 z 与接收距离 x 、热风速度 y 的线性公式为：

$$z = 44.83 + 1.146x + 0.05724y - 0.02061x^2 + 2.231 \times 10^{-5}xy - 3.033 \times 10^{-5}y^2$$

当接收距离不变时，热风速度增大，压缩回弹性率是先变大再变小的趋势，当热风距离不变时，接收距离变大，压缩回弹性率也是先变大后变小的趋势，具体情形如图 8 和图 9 所示：

利用 matlab 的 cftool 工具箱绘制出的三维拟合图，如图 10 所示：

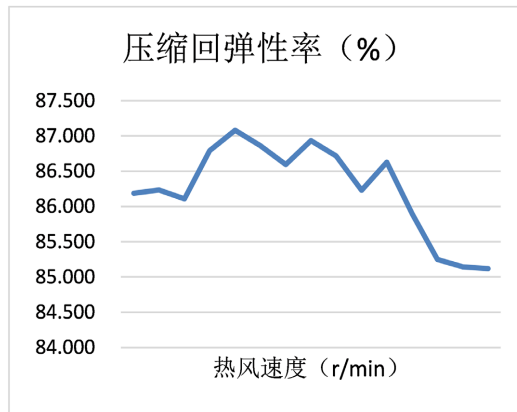


Figure 8. Relationship between compression rebound rate and hot air speed
图 8. 压缩回弹率与热风速度的关系

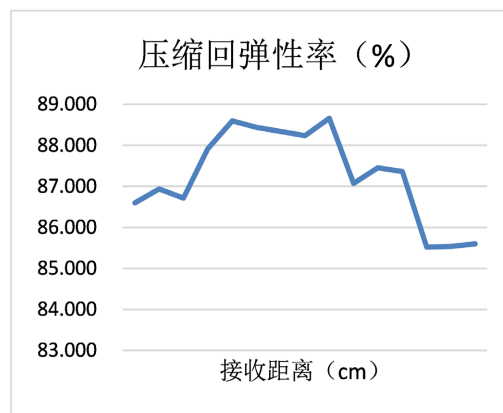


Figure 9. Relationship between compression rebound rate and receiving distance
图 9. 压缩回弹率与接收距离的关系

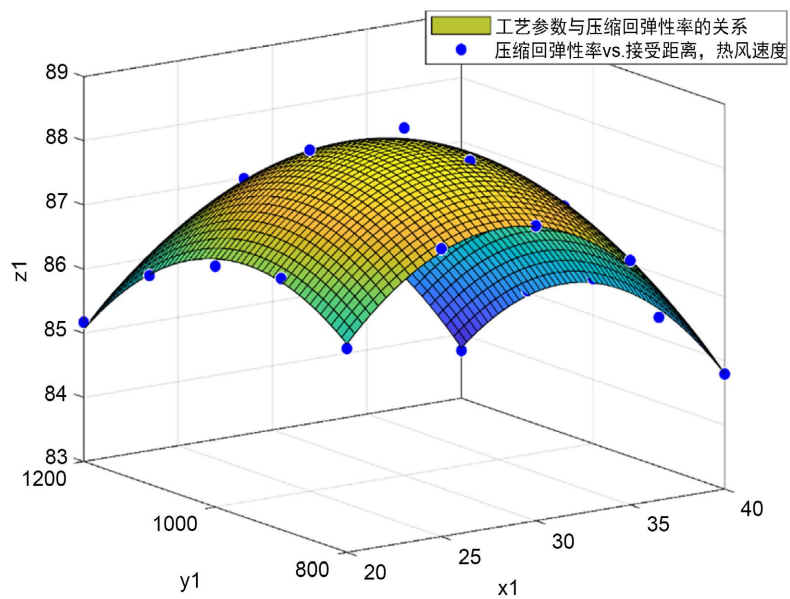


Figure 10. Relationship between process parameters and compression resilience
图 10. 工艺参数与压缩回弹性率的关系

拟合优度 $R^2 = 0.988$ ，误差平方和 $SSE = 0.4191$ ，均方根误差 $RMSE = 0.1485$ 。 R^2 越接近 1，说明误差平方和越接近 0，误差越小拟合效果越好。

3. 基于线性回归的过滤效率与工艺参数的研究

在使用皮尔逊相关系数之前，首先要使用雅克 - 贝拉检验来验证数据是否符合正态分布，从而判断是否可以用于求解皮尔逊相关系数。假设数据 $\{S_i\}$ 的偏度为 S ，峰度为 K ，我们构造如下 JB 统计量：

$$JB = \frac{n}{6} \left[S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right]$$

如果 $\{S_i\}$ 为正态分布，则在大样本情况下 $JB \sim \chi^2(2)$ ，则假设检验步骤如下：

H_0 : 该随机变量服从正态分布， H_1 : 该随机变量不服从正态分布。

然后计算该变量的偏度和峰度，得到检验值 JB^* ，并计算出其对应的 p 值。求得 p 值为 0.3171 大于 0.05，所以不能拒绝原假设[6]。其中只有少部分数据不服从正态分布对整体的结果影响很小，故我们认为这些数据都可以用于进行下一步的皮尔逊系数线性相关性分析。

假设厚度、压缩回弹性率、孔隙率、过滤效率、过滤阻力、透气性中任意两组数据分别是 $X: \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 和 $Y: \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ ，由于数据的个数较少为样本数据，则 Pearson 相关系数建模过程如下：

$$\text{样本均值: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

$$\text{样本协方差: } Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}$$

$$\text{样本皮尔逊相关系数: } r_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{S_X S_Y}$$

$$\text{其中: } S_X, S_Y \text{ 分别是 } X \text{ 和 } Y \text{ 的样本标准差, } S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad [7]$$

利用 matlab 的 corrcoef() 函数求 6 个指标各列之间的皮尔逊相关系数，结果如表 1 所示：

Table 1. Correlation coefficient of each index

表 1. 各指标之间相关性系数

皮尔逊相关系数	厚度	压缩回弹性率	孔隙率	过滤效率	过滤阻力	透气性
厚度	1	-0.527	0.897	-0.483	-0.795	0.354
压缩回弹性率	-0.527	1	-0.324	-0.010	0.498	-0.165
孔隙率	0.897	-0.324	1	-0.401	-0.737	0.279
过滤效率	-0.438	-0.010	-0.401	1	0.374	-0.789
过滤阻力	-0.795	0.498	-0.737	0.374	1	-0.410
透气性	0.354	-0.165	0.279	-0.789	-0.410	1

得到相关系数之后，再进行假设检验，判断其显著性，其步骤如下：

$$H_0 : r_{XY} = 0; H_1 : r_{XY} \neq 0$$

根据 p 值判断法，由于求得的 p 值为 0.0049 小于 0.01，说明其在 99% 的置信区间上拒绝原假设，说明其显著异于 0 [8]。

使用 SPSS 软件的线性回归分析得到以厚度、孔隙率、压缩回弹率作为自变量，过滤效应为因变量的三元函数。该函数的拟合优度 R^2 为 0.35，拟合度不高。通过结构变量与过滤效率的皮尔逊相关系数分析，可知压缩回弹性率对过滤效率的相关性小于 0.05，说明压缩回弹性率和过滤效率非线性关系。再次使用 SPSS 软件的单因素分析可得压缩回弹性率对过滤效率的显著性概率小于 0.05，说明压缩回弹性率对过滤效率无显著影响。故本文在求解拟合算法时，忽略压缩回弹性率对过滤效率的影响，自变量取厚度和孔隙率，因变量取过滤效率，得到的图形拟合优度为 1，如图 11 所示：

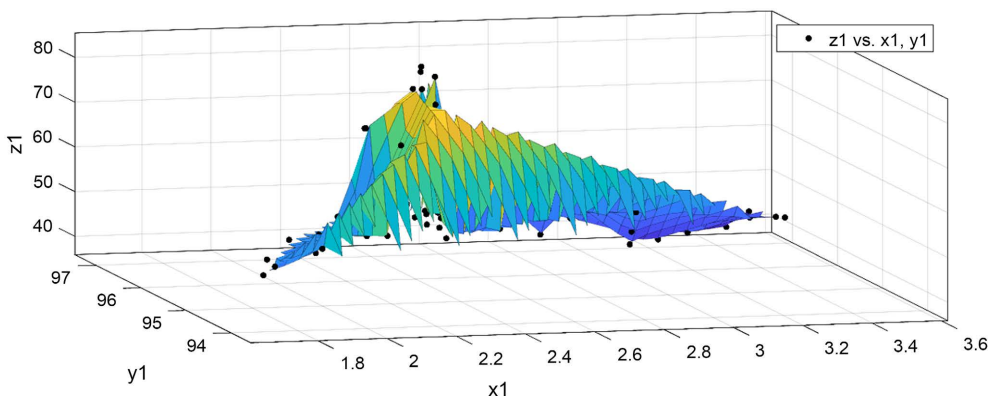


Figure 11. Fitting plot of filtration efficiency to thickness and porosity
图 11. 过滤效率与厚度、孔隙率的拟合图

上图由插值函数所得，虽然筛选出了主要变量但未得到函数表达式，无法进一步研究。在多次尝试线性回归分析后，最终发现由工艺参数和结构变量共同形成的未知参数与过滤效率所构成的线性回归函数的拟合优度为 0.61 为最优，使用拟合算法对函数再次进行修正最终得到函数的拟合优度为 0.76，最终表达式为：

$$Y = 1.39 * x(1) - 0.102 * x(2) - 0.083 * x(1)^2 - 0.00002 * x(2)^2 + 0.0046 * x(1) * x(2) - 29.1$$

三维拟合图如图 12：

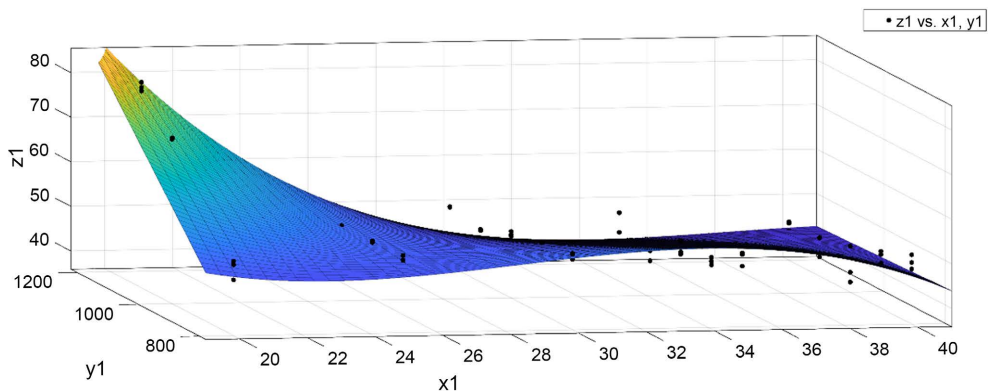


Figure 12. Modified fitting diagram of filtration efficiency with thickness and porosity
图 12. 修正后过滤效率与厚度、孔隙率的拟合图

根据实际生产环境可知接收距离为 10~60 cm，热风速度一般大于 400~600 (r/min)，适当的扩大接受距离和热风速度的范围，根据蒙特卡洛法和非线性函数规划模型得到，当接收距离为 64 cm，热风速度为 1608 (r/min)时，过滤效率最大，最大为 99.98%。

4. 基于规划模型求解最大过滤效率的参数组合

4.1. 加权多目标函数模型的建立

当有多个目标时，可以对多目标函数进行加权组合，使其简化成变成单目标规划，然后进行研究。将多个目标函数统一为最大化进行加权组合，如果目标的量纲不相同，则需要对其进行标准化后再加权。标准化方法：用目标函数除以某一个常量，该常量是这个目标函数的某个取值[9]。

实际现实生活中，产品生产需要兼顾各方面要求。例如接收距离小于 100 cm，热空气速度小于 2000 r/min，厚度小于 3 mm，压缩回弹性率高于 85%，过滤效率高的同时保证过滤阻力尽可能的小以防止熔喷非织造过滤材料因过滤阻力大使得大量颗粒堵塞孔隙致使过滤效率降低。我们令接收距离，热空气速度，厚度，压缩回弹性率，过滤阻力，过滤效率，孔隙率，透气性分别为 $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6, \chi_7, \chi_8$ 因为过滤阻力要求尽可能小为最小化变量，过滤效率尽可能大为最大化变量，所以将过滤阻力取负，使其转化为最大化变量，得到如下表达式：

$$\begin{cases} 0 < \chi_1 < 100 \\ 0 < \chi_2 < 2000 \\ 0 < \chi_3 < 3 \\ 85 < \chi_4 < 100 \\ \max \{ \chi_5, \chi_6 \} \\ \chi_3 = -2.965 - 0.01934\chi_1 + 0.008278\chi_2 + 0.001119\chi_1^2 + 6.383 \times 10^{-6}\chi_1\chi_2 - 3.314 \times 10^{-6}\chi_2^2 \\ \chi_4 = 44.38 + 1.146\chi_1 + 0.05724\chi_2 - 0.02061\chi_2^2 + 2.231 \times 10^{-5}\chi_1\chi_2 - 3.033 \times 10^{-5}\chi_2^2 \\ \chi_5 = -88.53 + 11.36\chi_1 + 0.06568\chi_2 - 0.2802\chi_1^2 - 0.005672\chi_1\chi_2 + 0.001803\chi_1^3 + 9.531 \times 10^{-5}\chi_1^2\chi_2 \\ \chi_6 = -4.8868\chi_1 + 0.0876\chi_2 + 0.01\chi_1^2 + 0.08\chi_2^2 - 0.001576\chi_1\chi_2 + 292.998 \\ \chi_7 = 68.58 + 0.2657\chi_1 + 0.04236\chi_2 + 0.0005143\chi_1^2 - 0.0002235\chi_1\chi_2 - 3.314 \times 10^{-6}\chi_2^2 \\ \chi_8 = 6178 - 342.2\chi_1 - 7.209\chi_2 + 3.313\chi_1^2 + 0.481\chi_1\chi_2 + 0.04939\chi_1^3 - 0.00779\chi_1^2\chi_2 \end{cases}$$

4.2. 回归系数求解

因为每个目标函数的量纲不同，因此对目标函数进行标准化处理消除量纲的影响后进行加权，再使用 SPSS 软件的回归分析得到如表 2 所示回归系数表：

Table 2. Filtration efficiency regression analysis results

表 2. 过滤效率回归分析结果

过滤效率	Coef.	Std. Err.	t	P > t	[95% Conf.	Interval]
接受距离(cm)	-1.441785	0.4509477	-3.20	0.002	-2.34188	-0.5416892
热风速度(r/min)	-0.047344	0.0151009	-3.14	0.003	-0.077486	-0.0172032
厚度(mm)	5.37696	8.345503	0.64	0.522	-11.28073	22.03465
孔隙率(%)	5.12051	1.788323	2.86	0.006	1.551002	8.690017
压缩回弹性率(%)	-3.564837	0.6161515	-5.79	0.000	-4.794681	-2.334994

Continued

过滤阻力(Pa)	-0.245913	0.2325403	-1.06	0.294	-0.710065	0.2182393
透气性(mm/s)	-0.084977	0.0103134	-8.24	0.000	-0.1055633	-0.064392
常数	-9.6394	150.7628	0.06	0.949	-310.5632	291.2844

由回归分析结果得到的表达式:

$$\chi_6 = -1.4418\chi_1 - 0.04734\chi_2 + 5.3769\chi_3 - 3.5648\chi_4 - 0.2459\chi_5 + 5.1205\chi_7 - 0.085\chi_8$$

对该式子进行分析, 得到 $R^2 = 0.8148$, $Prob(F)$ 趋近 0, 说明此方程显著, 即过滤效率与其余七个指标有着显著的线性关系。过滤效率尽量高且过滤阻力尽可能小的约束下, 得到的工艺和结构参数组合如表 3 所示:

Table 3. Specific values of each parameter

表 3. 各参数具体数值

接收距离 (cm)	热风速度 (r/min)	厚度 (mm)	孔隙率 (%)	压缩回弹性 率(%)	过滤阻力 (Pa)	过滤效率 (%)	透气性 (mm/s)
17	1104	2.249	95.8	85.1	31.93	98.88	143.9

5. 结语

在通过多种变量不同组合的尝试后, 得到最优化的多项式拟合模型。将数据进行异常值处理后, 带入附件 1 数据的代入, 得到各工艺参数与结构变量之间的线性关系式, 通过折线图实现数据可视化, 并利用 matlab 的 cftool 工具箱绘制出的三维拟合图, 得到拟合效果最优的关系式。并得到结论, 当热风速度与接收距离两者其中一个保持不变, 另一个增大时, 厚度和孔隙率增大, 压缩回弹性率则是呈现先变大再变小的趋势。

在使用雅克 - 贝拉检验验证得到数据符合正态分布后, 建立样本皮尔逊性相关系数模型。利用 matlab 求出 6 个指标各列之间的皮尔逊相关系数, 结合 P 值判断法得到其显著异于 0 的结论。使用 SPSS 软件的线性回归分析功能进行多次尝试并使用拟合算法进行优化, 得到最优解。根据蒙特卡罗法和非线性函数规划模型得到当接收距离为 64 cm, 热风速度为 1608 (r/min) 为符合实际生产中的工艺参数范围, 过滤效率最大为 99.98%。

在探究使过滤效率尽可能大且过滤阻力尽可能小的参数组合时, 再消除量纲的影响以及将变量都转化成最大化变量后, 通过加权组合, 将多目标规划问题简化成单目标规划。在使用 SPSS 对附件 1 中数据进行回归分析后, 得到目标规划的最终表达式。通过拟合优度和显著性的分析, 当工艺参数组合为接受距离为 17 cm, 热风速度为 1104 r/min 时, 得到的产品的结构参数组合为厚度为 2.249 mm, 孔隙率为 95.8%, 压缩回弹性率为 85.1%, 产品性能为过滤阻力为 31.93 Pa, 过滤效率为 98.88%, 透气性 143.9 mm/s。

参考文献

- [1] 韩玲, 胡梦缘, 马英博, 郝栋连. 医用非织造口罩材料及其新技术的研究现状[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(2): 20-25. <https://doi.org/10.13338/j.issn.1674-649x.2020.02.003>
- [2] 何宏升, 邓南平, 范兰兰, 康卫民, 刘亚, 庄旭品, 程博闻. 熔喷非织造技术的研究及应用进展[J]. 纺织导报, 2016(S1): 71-80. <https://doi.org/10.16481/j.cnki.ctl.2016.s1.012>
- [3] 武辉. 插层熔喷气流场模拟及其过滤材料性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [4] 杨恒, Frank Bosselman, 陈明, 秦水元, 王建培. 最小二乘原理多项式拟合激光陀螺数学模型的方法研究[J]. 应

用激光, 1998(6): 241-244.

- [5] 寿媛, 陈豫眉. 利用 MQ 拟插值解决高次插值所出现的龙格现象[J]. 洛阳师范学院学报, 2016, 35(5): 6-9. <https://doi.org/10.16594/j.cnki.41-1302/g4.2016.05.002>
- [6] 何清, 王震坤. 正态性检验方法在教学研究中的应用[J]. 高等理科教育, 2014(4): 18-21+77.
- [7] 王殿武, 赵云斌, 尚丽英, 王凤刚, 张震. 皮尔逊相关系数算法在 B 油田优选化学防砂措施井的应用[J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(7): 26-28. <https://doi.org/10.19482/j.cn11-3237.2022.07.07>
- [8] 杨刚. 假设检验中的 P 值研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2012, 24(2): 65-67.
- [9] 姚煜, 胡涛, 付建勋, 胡顺波. 小样本分散数据的回归建模和多目标优化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(3): 451-462.

附 录

附件 1. 处理异常值后的数据

接收距离 (cm)	热风速度 (r/min)	厚度 mm	孔隙率(%)	压缩回弹性 率(%)	过滤阻力 Pa	过滤效率 (%)	透气性 mm/s
40	800	2.759	96.016	84.794	25.662	49.778	633.039
40	900	3.048	96.934	85.323	26.334	46.950	534.624
40	1000	3.278	96.994	85.572	21.852	41.555	498.196
40	1100	3.422	96.731	85.033	23.529	42.164	467.471
40	1200	3.518	96.799	83.744	23.946	43.509	439.156
35	800	2.403	96.039	86.810	30.999	51.019	423.224
35	900	2.696	96.316	87.296	27.880	47.077	456.940
35	1000	2.922	96.531	87.167	26.657	46.214	469.289
35	1100	3.066	96.423	87.084	22.489	41.887	510.450
35	1200	3.159	95.999	85.714	23.544	41.644	480.616
30	800	2.116	94.953	87.596	36.475	52.517	410.651
30	900	2.397	95.628	88.253	31.952	51.205	409.088
30	1000	2.617	96.417	88.413	30.004	50.224	408.313
30	1100	2.775	96.366	87.359	28.018	46.425	458.490
30	1200	2.855	96.134	86.375	27.903	49.138	421.810
25	800	1.880	94.165	87.486	32.685	52.511	429.574
25	900	2.159	95.259	87.938	32.279	52.752	400.818
25	1000	2.375	95.978	88.318	31.815	51.036	410.554
25	1100	2.515	96.362	87.517	30.580	50.021	424.415
25	1200	2.610	96.105	86.223	28.921	49.507	439.174
20	800	1.700	93.966	86.179	33.441	50.921	470.217
20	900	1.983	95.045	86.915	33.339	52.537	425.211
20	1000	2.183	95.451	86.752	31.460	72.928	409.449
20	1100	2.331	95.751	86.253	30.660	80.929	215.897
20	1200	2.409	95.850	85.172	28.318	82.975	209.305